

# 北大集中講義

## 後半分のスライド

### 前回の復習

- 電波の性質
- 望遠鏡の分解能  $\theta \sim \lambda/D$
- 電波の観測量: フラックスと輝度
- 輻射輸送の式
- 黒体輻射
- 輝度温度、VLBIの感度
- 高輝度放射1: メーザー放射
- 高輝度放射2: シンクロトロン放射
- 干渉計の原理

# 電波干渉計

## 干渉計の生みの親: Martin Ryle

1974年ノーベル賞

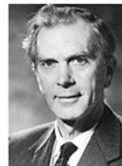
- Marin Ryle (1918-84)  
英国ケンブリッジ大学で  
電波干渉計を開発

同時受賞はA. Hewish (パルサーの発見)



### The Nobel Prize in Physics 1974

"for their pioneering research in radio astrophysics: Ryle for his observations and inventions, in particular of the aperture synthesis technique, and Hewish for his decisive role in the discovery of pulsars"



**Sir Martin Ryle**  
1/2 of the prize  
United Kingdom

University of Cambridge  
Cambridge, United Kingdom  
b. 1918  
d. 1984

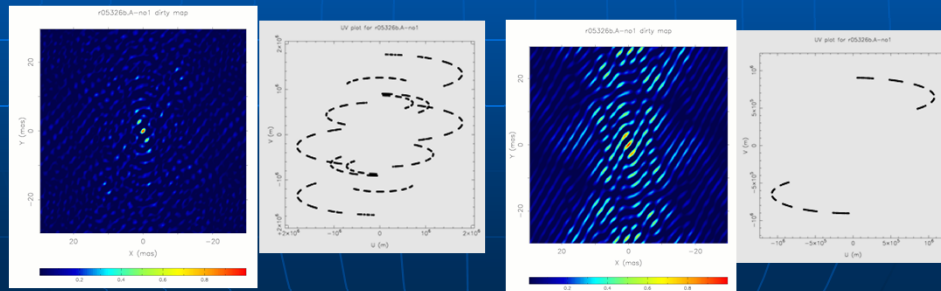


**Antony Hewish**  
1/2 of the prize  
United Kingdom

University of Cambridge  
Cambridge, United Kingdom  
b. 1924

## UVとビームパターン

- $I(x,y) = \iint S(u,v) \exp(-2\pi i(ux+vy)) du dv$   
 実観測では(u,v)サンプルが不完全であり、点源が点源として観測されない。強度1の点源を観測したときに得られるイメージをビームパターンという。



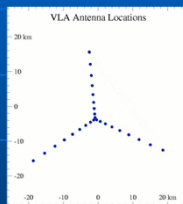
通常のVERAのUVとビーム( $\delta=+13^\circ$ )

水沢-入来基線のみのUVとビーム( $\delta=+13^\circ$ )

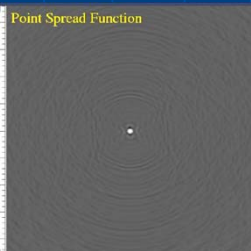
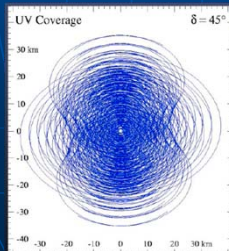
## VLAのビームパターン

- 27台のアンテナをY字状に配置し、最適なビームが得られる。

局配置



イメージ



UVとビームパターン

## センチ波の干渉計

- 系外銀河のHI観測などで活躍



WSRT (Westerbork 干渉計)



VLA (Very Large Array)

## センチ波の干渉計

Ryle telescope (英国)  
13m x 8台



ACTA (豪州)  
22m x 6台





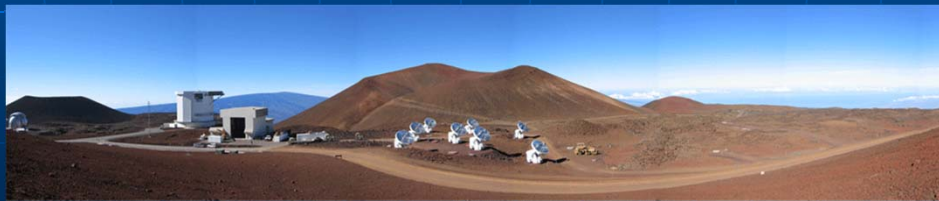
## ミリ波干渉計の例



野辺山10m干渉計 10m x 6台



IRAM (仏) 15m x 6台



SMA 6m x 8台 (サブミリ波)

## VLBIとは？

- 電波干渉計の分解能も  $\theta = \lambda / D$   
ただし、Dは干渉計の最大基線長
- 基線長Dを地球規模にとれば、究極の分解能を持った装置が得られる

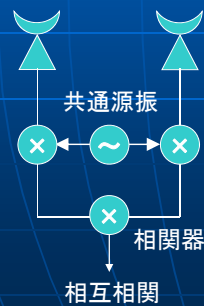
→ VLBI: Very Long Baseline Interferometer

## 結合素子型干渉計とVLBI

- 両者は原理的に同じだが、技術的には違いがある。

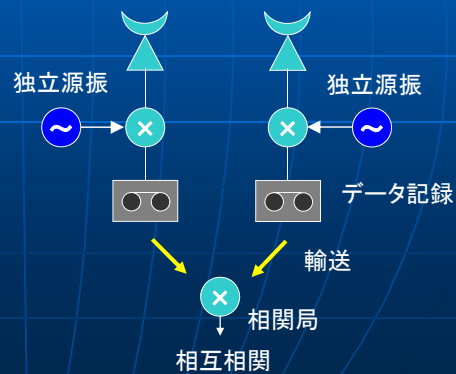
結合素子型:

すべてのアンテナはケーブルで接続されていて、原振も共通。



VLBI:

アンテナ間は接続されていない。原振は独立で、データは記録して相関局へ輸送。



## VLBIを特徴づける装置

- 周波数標準  
原振が独立なので、アンテナ間で可干渉性を保つため、超高安定度の原振(周波数標準)が必要
- レコーダー  
相関局へのデータ輸送のため、記録媒体にデータを記録する(磁気テープ、HDDなど)



水素メーザー  
(アンリツ製)

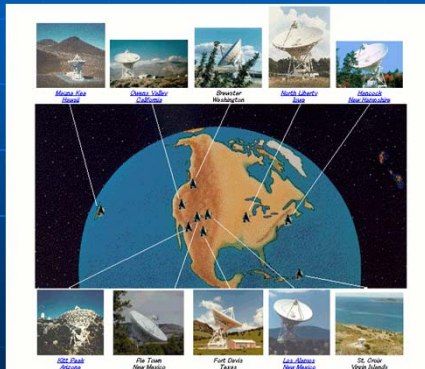


データレコーダー DIR-2000とテープ(ソニー製)

# VLBI: Very Long Baseline Interferometer

VLBA (米国)  
25m x 10台

EVN (ヨーロッパを中心に世界中の望遠鏡が参加)



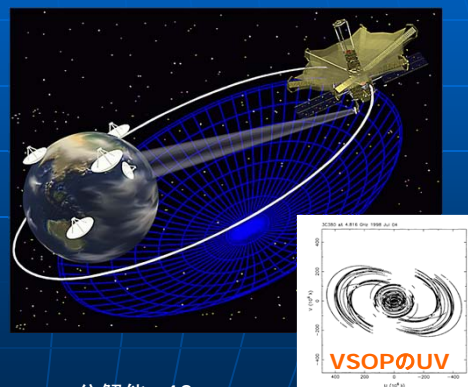
## VLBIアレイの例 2

VERA  
20m x 4台



分解能 1 mas  
波長1 cm, D = 2300 km

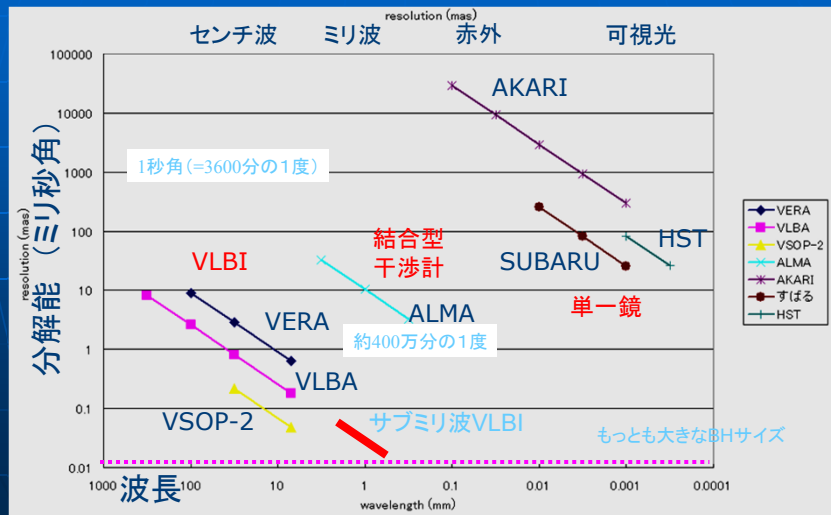
VSOP-2 (VLBI用アンテナを積んだ衛星, 2017年打上予定)



分解能 40  $\mu$ as  
波長7 mm, D = 30000 km

# VLBIの分解能

## ■ 様々な望遠鏡の分解能の比較



# 将来の干渉計

より大きい望遠鏡を求めて国際協力の時代に

## ALMA

チリのアンデス山地(標高5000m)  
日米欧で計80台のアンテナを建設



ACA : 日本分担箇所  
ミッシングフラックスを防ぐ役割

## SKA

国際協力で1km平方の集光面積を持つ望遠鏡を計画中



## 関連技術1: 測地VLBI



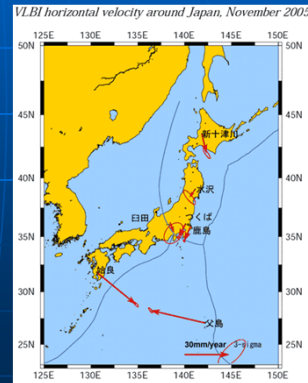
- VLBI(電波干渉計)は、位置の判っている星の観測から地面の動きを求めることも可能  
(大陸移動説を実証)



国土地理院の  
筑波32m望遠鏡



VLBIは日本の経緯度を定める「線の下力持ち」  
日本地図における  
VLBIの役割



VLBI horizontal velocity around Japan, November 2005  
日本列島の動き

## 電波干渉計の関連技術2

- GPS (Global Positioning System)  
24機の人工衛星からの電波によって位置を計測するシステム。衛星からの電波の遅延時間を用いて位置を計測 (カーナビなど日常生活で利用)。



GPS衛星: 衛星には原子時計が積まれ、時刻と衛星位置を地表にむけて送信している



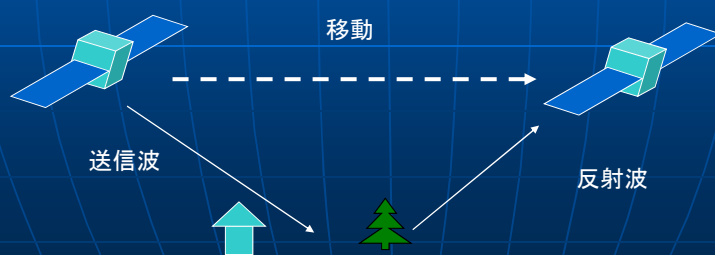
GPSの分布の模式図



## 電波干渉計の関連技術3

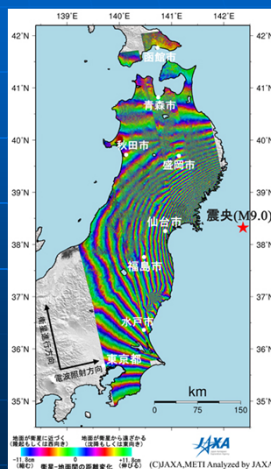
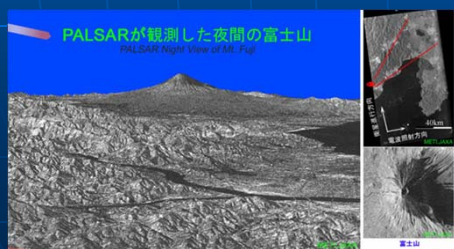
- 開口合成レーダー(SAR; Synthetic Aperture Radar)

移動する衛星からレーダーを目標に照射し、送信波と受信波を干渉させる。リモートセンシングで活躍



## 例: 地球観測衛星「だいち」

- 開口合成レーダーは地球観測でも活躍

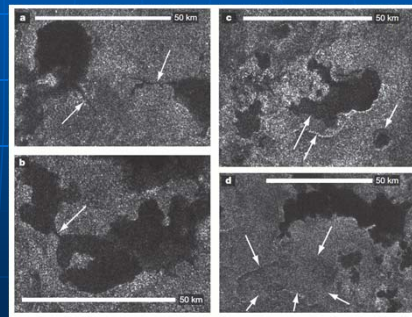
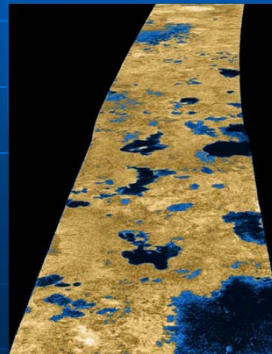
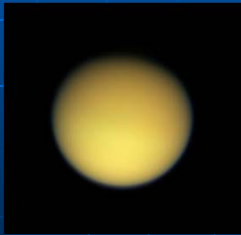


3月11日の地震による地殻変動

## カッシーニによるタイタン観測

- ESAの衛星カッシーニがタイタンをSARで観測。メタンの湖を発見(2007)

土星の衛星タイタン  
メタンの大気を持つ



カッシーニが得たレーダー画像。  
暗いところが観測輝度が低い

地形の詳細。輝度が低い  
領域は湖のような地形を示す

## 銀河系構造



# 銀河回転運動

- 銀河回転により、天体はLSRに対して運動速度を持つ

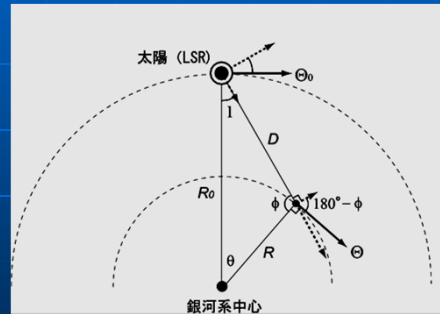
視線速度  $V_r$

接線速度  $V_t$

$$V_r = \left( \frac{\Theta}{R} - \frac{\Theta_0}{R_0} \right) R_0 \sin l,$$

$$V_t = \left( \frac{\Theta}{R} - \frac{\Theta_0}{R_0} \right) R_0 \cos l - \frac{\Theta}{R} D,$$

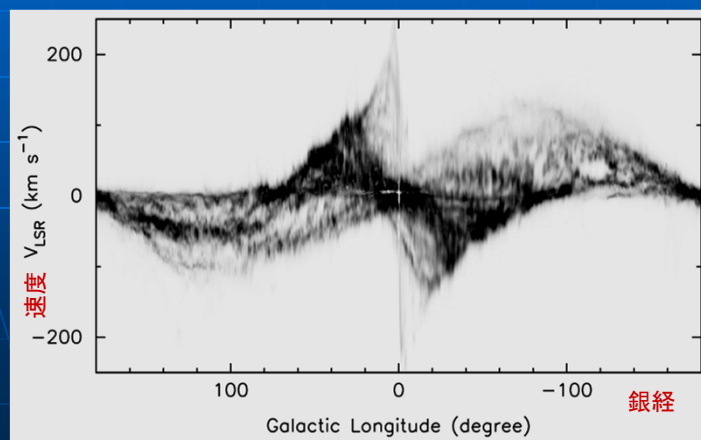
いずれもLSRに対する相対値



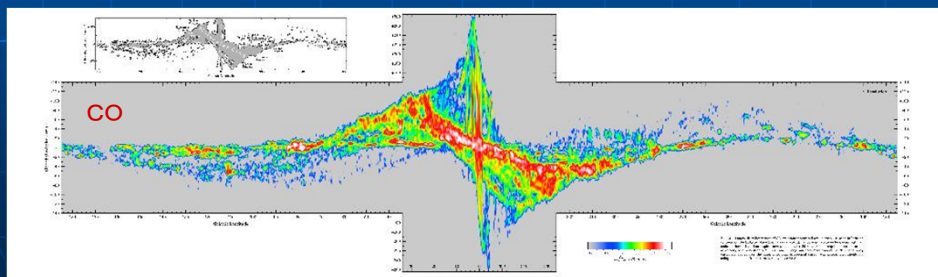
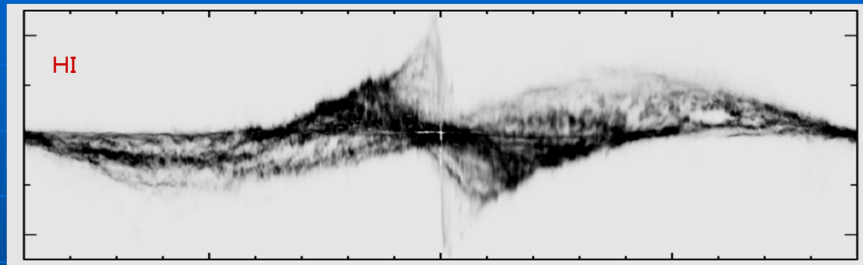
銀河系回転の模式図

# 銀河系のHIのI-v図

- I-v図:  $b=0$ のガスの視線速度を図示したもの
- 中心対称な分布→銀河系の回転

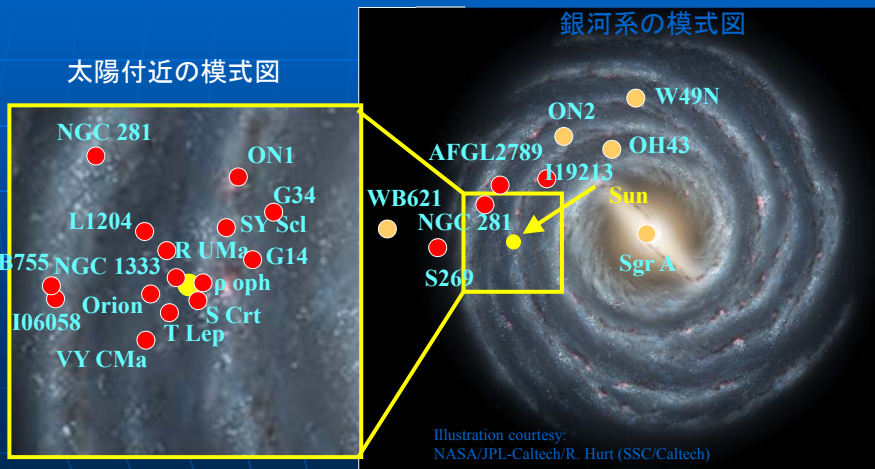


# CO と HI の I-v 図



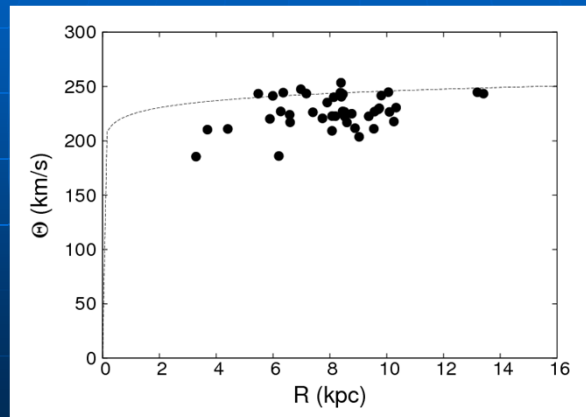
# VERAによる位置天文計測

年周視差・固有運動が計測された星の分布



## Rotation curve

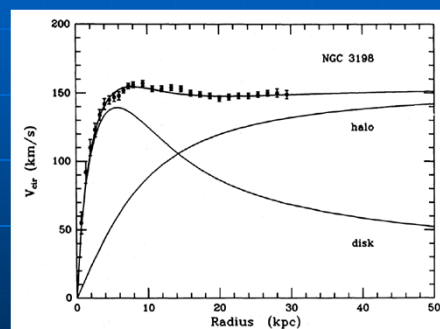
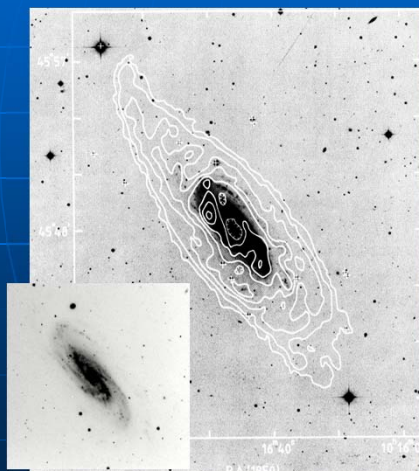
- Rotation curve obtained from 3D motions of  $\sim 40$  sources (not from radial velocities)



Basically consistent with flat rotation between 4 to 13 kpc

## 系外銀河の例: NGC 3198

- 広がったHIと平坦な回転曲線



回転曲線: 銀河回転速度 $V$ を銀河中心距離 $R$ の関数として図示したもの

## ダークマターの種類

- 大きくわけて2種類

MACHO : Massive Astrophysical Compact Halo Object

重力で束縛された天体的なダークマター

WIMP : Weakly Interacting Massive Particle

素粒子的なダークマター

- 天体的なダークマター(MACHO)は1990年代から勢力的に探査が行われたが、銀河系のダークマター総量を説明することは難しい → 現在はWIMPが有力候補

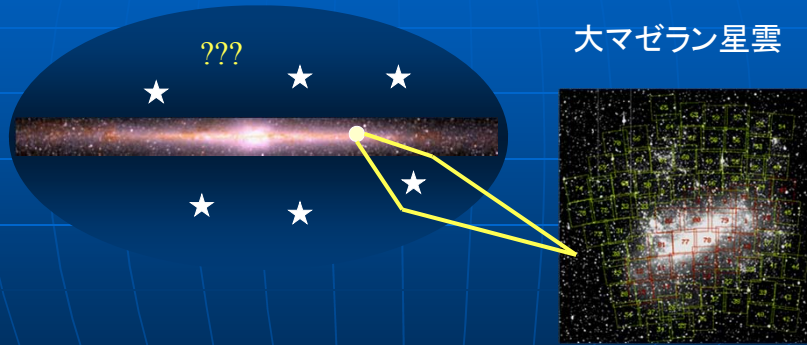
## MACHO候補天体

- ブラックホール
- 白色矮星(太陽質量程度の星の燃えかす)
- 中性子星(大質量星の残骸)
- 褐色矮星、惑星(核反応が起こらない天体)

or something more exotic (e.g.,  
Boson star etc)

## マイクロレンズを用いた暗黒物質の探査

- 暗黒物質： 光を出さない謎の物質  
天の川中にも大量にある（ダークハロー）



- マゼラン星雲の星の前を、暗黒物質天体が横切ると、マイクロレンズ現象が発生 → これを用いて暗黒物質を探す

## 重力レンズによるイメージ

### 重力レンズを受けたVERA石垣島局



レンズなし

レンズあり

像のゆがみにより、増光する(面積が拡大)

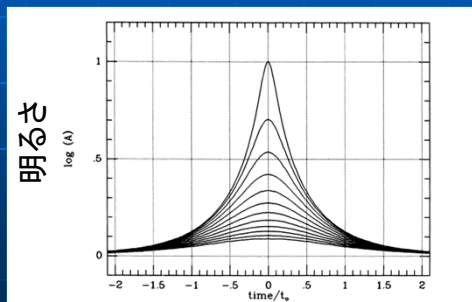
## マイクロレンズの観測

- 多重像は分解できないが、像の明るさの変化を捉えることは可能 (Paczynski 1986)



$$A_{1,2} = \left| \frac{r_{1,2} dr_{1,2}}{udu} \right| = \left| \frac{r_{1,2}^4}{r_{1,2}^4 - 1} \right|$$

$$A = |A_1| + |A_2| = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$



Time variation of the amplification due to gravitational microlensing for events with the impact parameter  $u/R_s$  equal 0.1, 0.2, ..., 1.1, 1.2.

時間

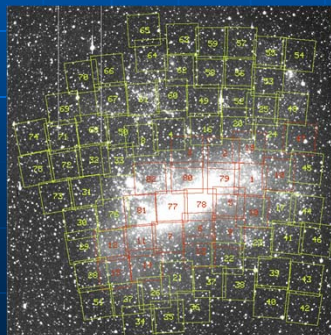
## MACHO と EROSによる観測

多数の星のモニターを開始

- MACHO (米豪)
- EROS (仏)

マゼラン雲方向: 900万個  
バルジ方向: 数千万個

ほぼ毎日、数年間観測



## マイクロレンズ現象の検出

- マゼラン雲の星の前を横切る天体を検出  
(Alcock et al.1993)

星の明るさが変化する様子

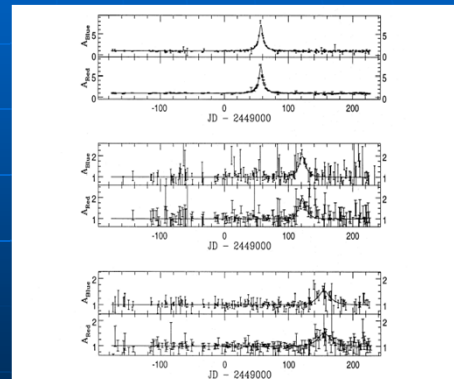


FIG. 7.—The light curves of the three candidate microlensing events. The solid lines show the best-fit microlensing curves, with the parameters shown in Table 1. Units as in Fig. 3.

マイクロレンズ天文学の幕開け

## マイクロレンズ観測の国際競争

- MACHO、Super-MACHO (米豪)
- EROS (仏)
- OGLE (ポーランド)
- MOA (日本、ニュージーランド)
  
- PLANET (国際協力)
- GMAN (国際協力)

いずれも1mクラスの小口径望遠鏡を占有して観測



# DM≠MACHO

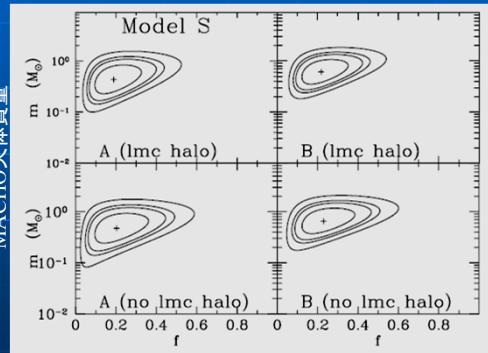
- LMC方向のMACHOグループの6年間の結果  
1200万個の星のモニター、15イベント



天体質量  
 $\sim 0.5 M_{\text{sun}}$   
 ハローに占める割合  
 $\sim 20\%$

銀河系のダークマター  
 を説明するのに不十分

※これらの天体が何かは興味深いが...

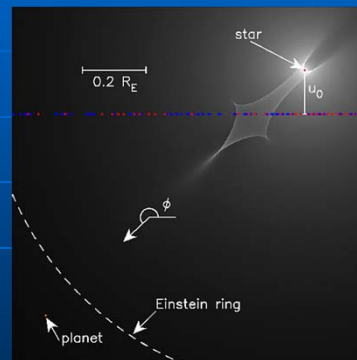
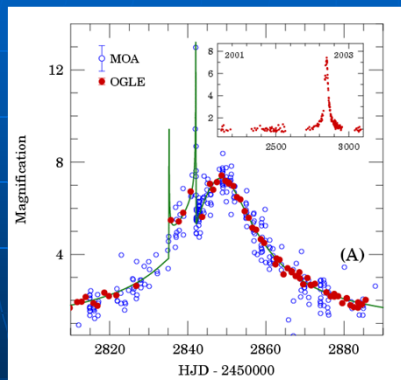


ハローに占める割合

Alcock et al. 2000

## 余談: マイクロレンズによる惑星探査

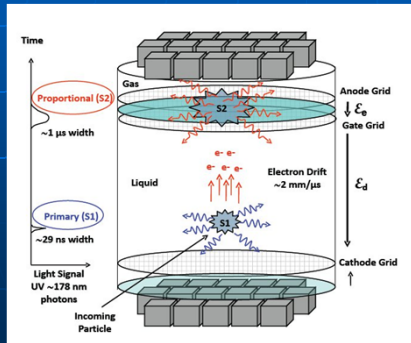
- マイクロレンズ法はその後惑星探査に活躍している



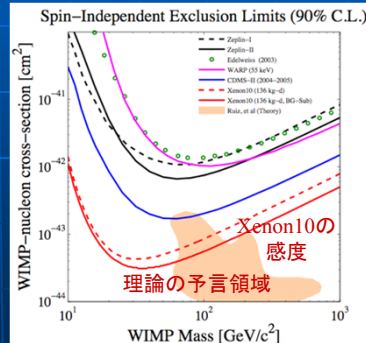
主星の質量 0.36太陽質量、惑星の質量 1.5木星、距離3AUを  
 国際観測で検出した例

## WIMPダークマター研究の展望

- 現在のダークマター最有力候補：相互作用をほとんどしない素粒子 WIMP（ニュートラリーノなど）
- 今後10～20年でダークマター粒子(WIMP)が地上で直接検出される可能性あり（例 米国XENON10, 神岡Xmass実験）



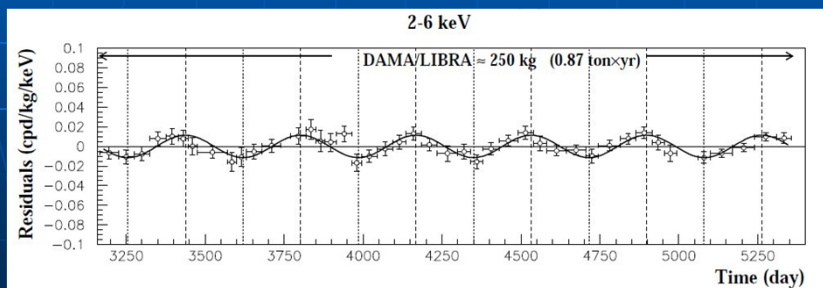
Schematic view of Xenon 10



Xenon10の結果 (Angle et al. 2008)

## DAMAの結果

- イタリア／中国のグループがダークマターのシグナルをとらえたと主張(DAMA)
- シンチレーション数に1年周期の変動  
 >地球公転によるDMの“風”の変化？



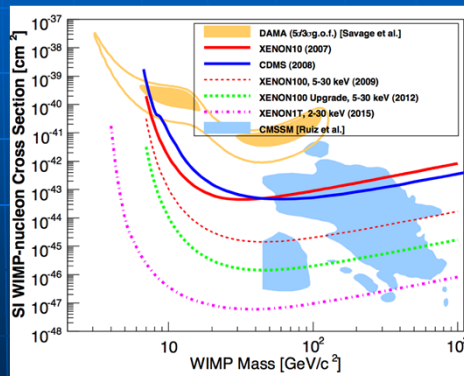
Results from DAMA/LIBRA : Bernabei+(2010)

## Xenon 100 の結果

- Xenon100の最新結果 (2010)

- No signal

- DAMAの結果と矛盾している...



Aprile+(2010)

## ダークマター粒子と銀河回転

- ダークマターが検出された際、素粒子の性質を決めるのに、銀河回転速度 $\Theta_0$ は最も重要なパラメーター

$$\text{WIMP検出率} \propto \rho_{\text{DM}} \times V_{\text{DM}} \sim (\Theta_0)^3$$

$$(\rho_{\text{DM}} \propto (\Theta_0)^2 \sim 0.3 \text{ GeV/cm}^3)$$

- VERA等の位置天文学観測による銀河回転計測がダークマター問題の解決にも貢献可能

## 銀河系構造のまとめ

### 円盤構造

- 棒状構造を持つ
- 渦状腕を持つ。4 arm (2 major + 2 minor ?)
- 回転曲線はほぼ平坦

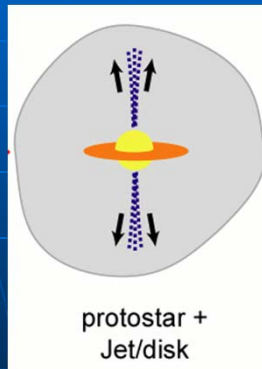
### ハロー

- 大量の暗黒物質
- 正体は不明。MACHOよりはWIMPが優勢

## VLBIで見る星形成

# 星形成とメーザー

## ■ 原始星周囲でのメーザーの居場所



ジェット・アウトフロー先端のショック領域

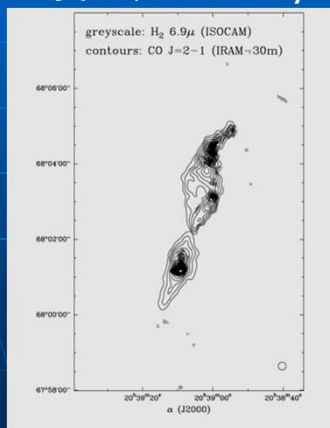
H<sub>2</sub>O, OH,  
CH<sub>3</sub>OH(class-I)

降着円盤

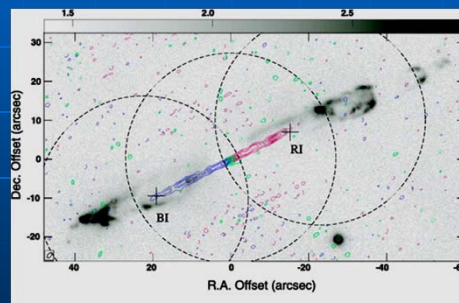
CH<sub>3</sub>OH(classs-II,?),  
H<sub>2</sub>O(?), (SiO?)

# 原始星からのアウトフロー/ジェット

- 原始星から双極流的に放出される  
速度 数10 km/s ~ 数100 km/s



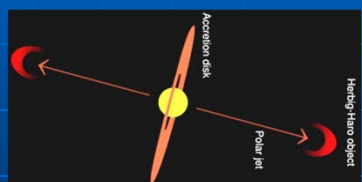
L1157 with CO and IR



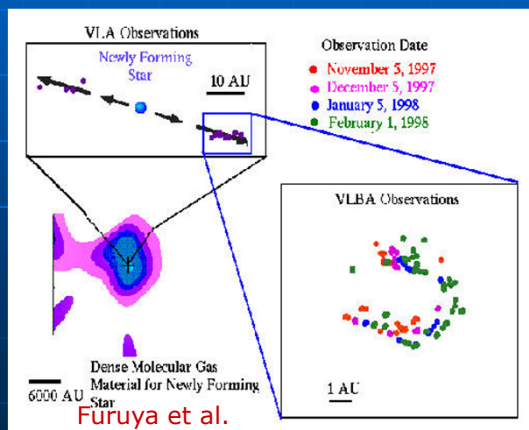
HH211 with SiO (J=5-4) and IR

# 星形成領域のメーザー

- 水メーザーは主に原始星ジェットのショック領域をトレース。運動が容易に検出できる。

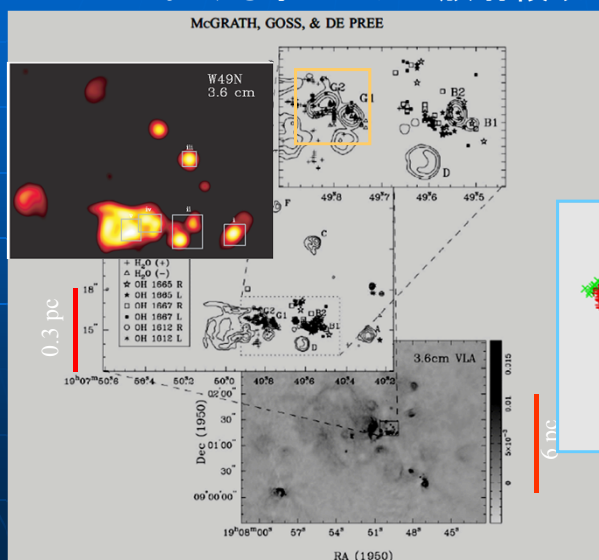


S106 FIR

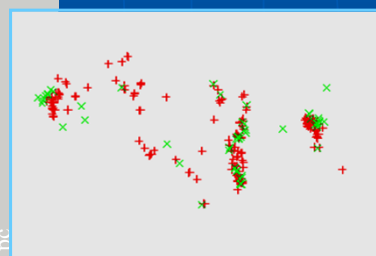


# W49AとW49N水メーザー

## W49Aにおける水メーザー放射領域



VERAで観測したW49N  
(過去の観測との比較)  
1982年(赤) - 2003年(緑)  
ショック領域が前進する様子



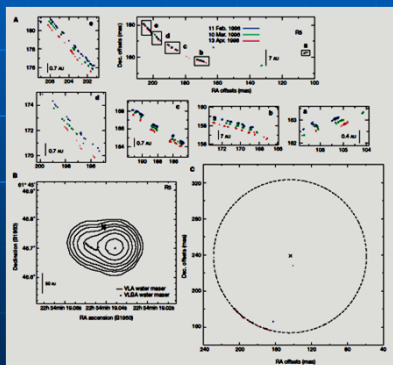
J, K, 3.6cm の3色合成

## 水メーザーOutflowの謎

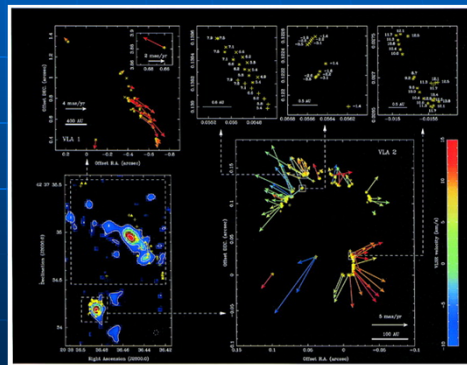
- 球対称シェル

最近見つかった球対称シェル（まだ 2例）

双極流と違う種族？異なる進化段階？



Cep A (Torrelles et al. 2001)



W75N (Torrelles et al. 2003)

## 大質量形成のシナリオ

- 降着説 or 合体説

降着説は、中小質量星と基本的に同じプロセス

しかし、中心星が $10M_{\text{sun}}$ 程度に達する前に輻射によって降着がストップするという説もある

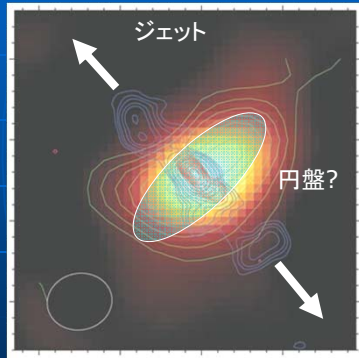
合体説は、降着説に変わるシナリオとして、星形成領域中心部で中小質量星の合体(3体衝突)によって大質量が形成されるという説

鍵は、大質量星周囲の降着円盤の有無

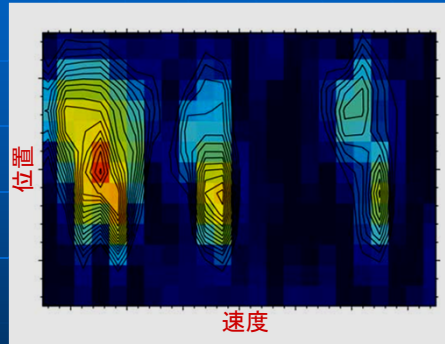


# Cep-A HW 2の例

## ■ Cep A HW2の周囲に円盤？



Patel et al. 2005

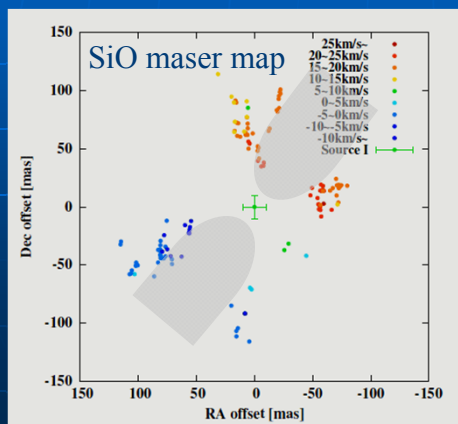


位置-速度図の傾斜が回転を示唆  
15M\_sun (CH3CN with SMA)

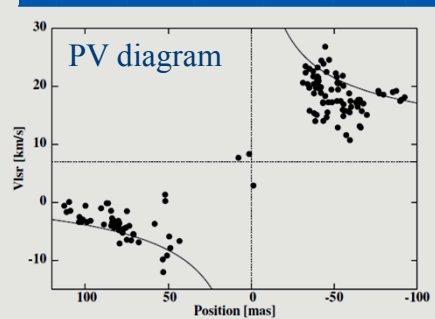
が、単純なケプラー回転でないという説、複数の星が存在するという説も

# オリオンKL SiO メーザー

- 年周視差 :  $2.39 \pm 0.06 \text{ mas} = 419 \pm 6 \text{ pc}$
- 速度構造 : 回転 + 膨張(?)



Kim et al. 2008

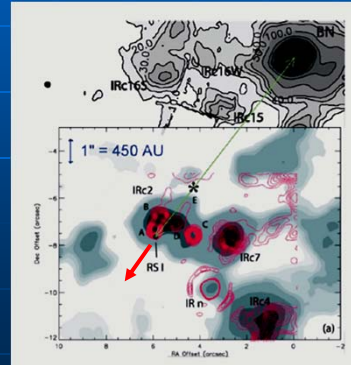
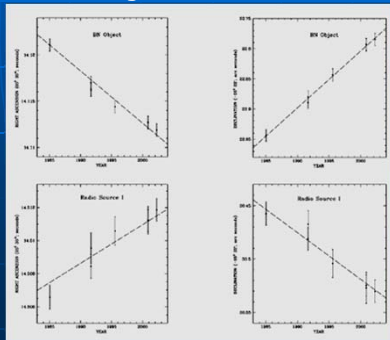


Keplerian disk with  $\sim 7 M$

## 対立するシナリオ(合体説)

- 合体説の証拠はrunaway starの存在  
(3体衝突によってはじき飛ばされた星)

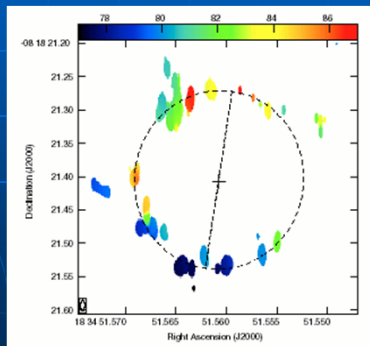
Rodriguez et al. 2005



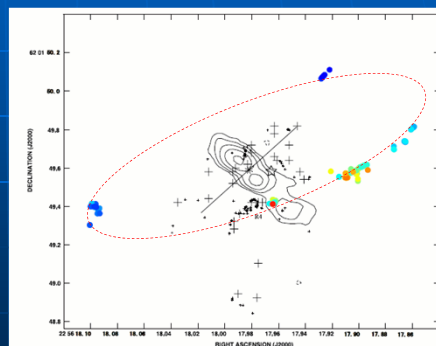
Orion BN & source Iが遠ざかる運動 > runaway star ?

## メタノールメーザー

- 大質量星周囲で観測される。
- 正体は不明。原始星円盤に付随する可能性も



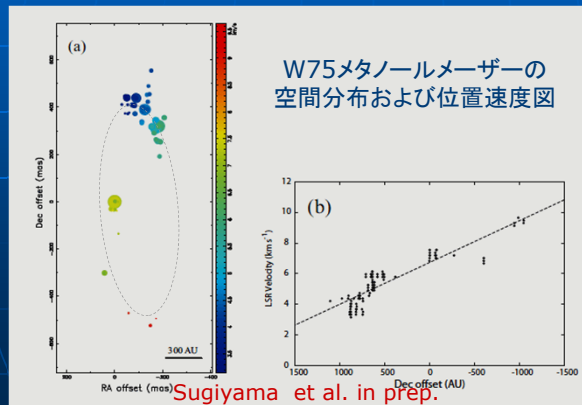
G23.657 (Bartkiewicz et al.)  
ケプラー回転する円盤の可能性も



Cep-A HW2 (Sugiyama et al.)  
中心星の周りにリング状に分布？

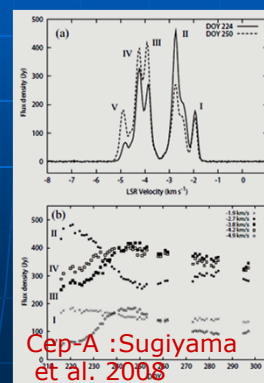
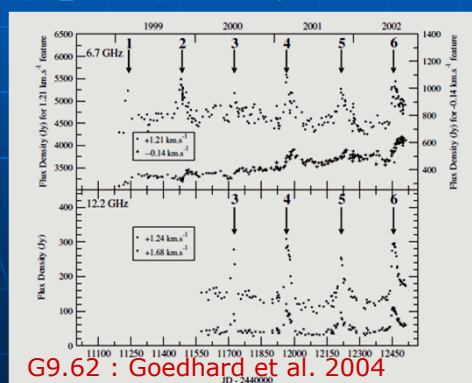
# W75のメタノールレーザー円盤

- リング状に分布し、直線的な速度勾配
- ケプラーディスク？（固有運動が鍵、計測中）



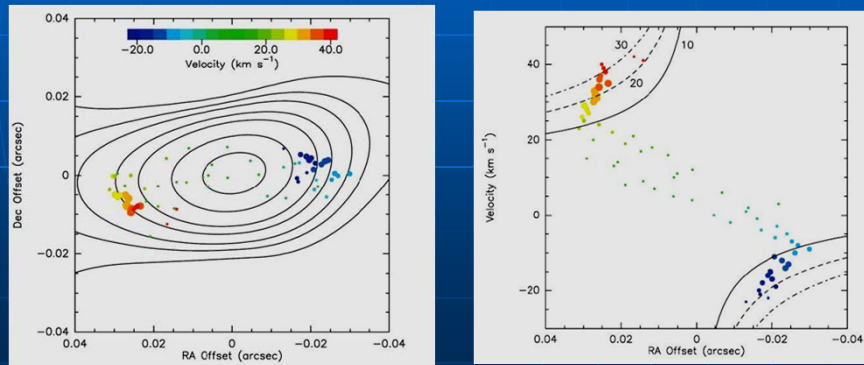
# メタノールレーザーの変動

- 周期的にフレアを起こすメタノールレーザー天体が知られている。円盤など安定な構造上に付随することを示唆（ジェットの先端部のショックでこのような変動を起こすのは難しい？）



## 再結合線メーザー

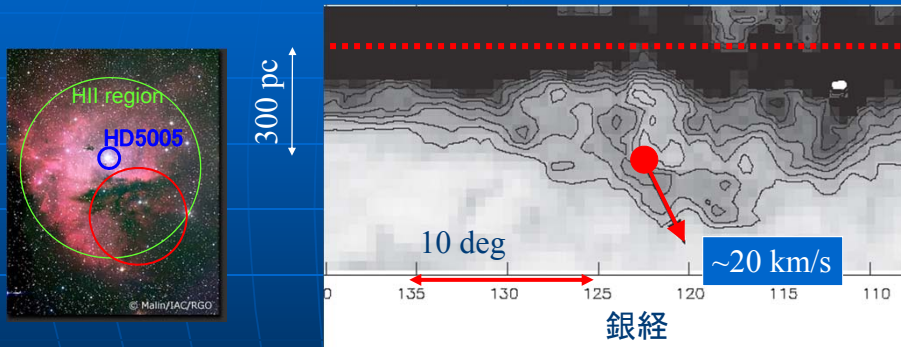
- HII再結合線のメーザーが極少数の天体で星周辺円盤から観測されている(MWC349 :ただし, peculiar Be Star)



(MWC 349 with SMA, Moran et al. 2008)

## 超新星爆発による分子雲圧縮

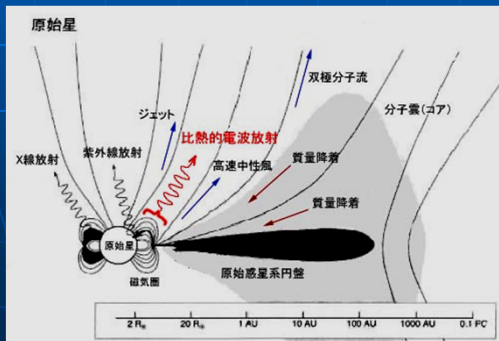
NGC 281: 銀河面から出るスーパーバブル上の星形成領域



VERAによって、銀河面から離れる運動を検出 (Sato et al. 2007)  
 超新星などによって吹き飛ばされたというシナリオをサポート  
 $E \sim 3 \times 10^{52}$  erg (multiple SNe),  $t \sim 10$  Myr

# 原始星のVLBI観測

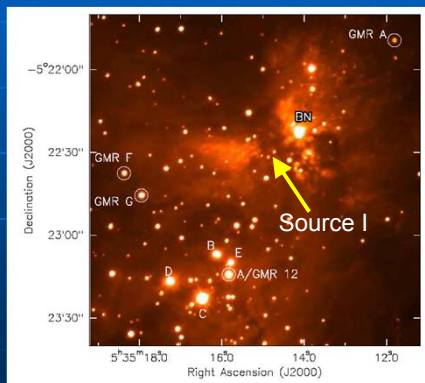
- 原始星磁気圏近傍からのジャイロシンクロトン放射が観測されている天体がいくつかある(近傍の Weak-line T Tau Starのみ)



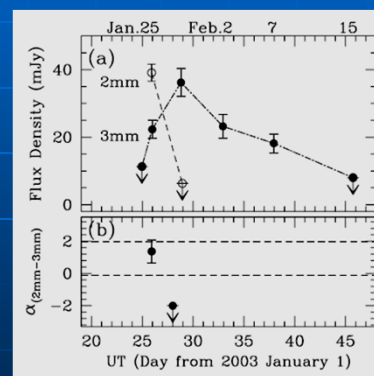
原始星近傍の模式図  
(VSOP-2 web pageより)

# Orion GMR-Aの例

- オリオン領域にある小質量星
- ジャイロシンクロトン放射、フレアを起こす



Menten et al. (2007)



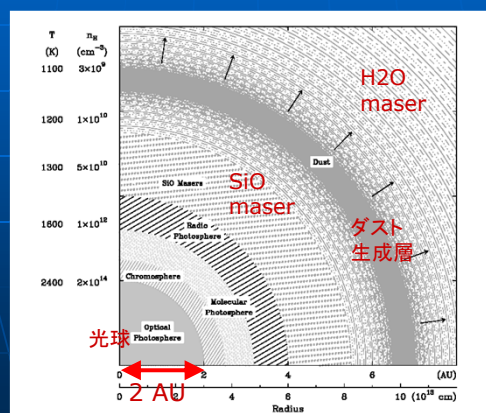
Furuya et al. (2003)

原始星近傍の活動性として興味深い。ただし、VLBIでも分解は難しい

# AGB星

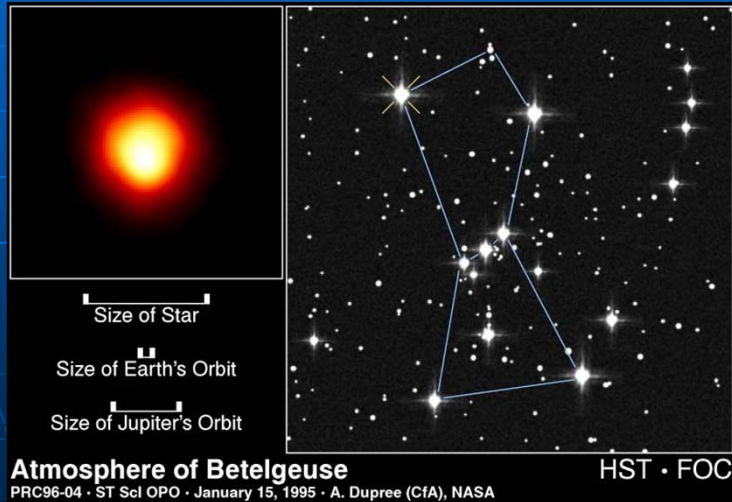
## AGB星の星周領域

- AGB星: 年老いた星。質量放出をしながら脈動している。



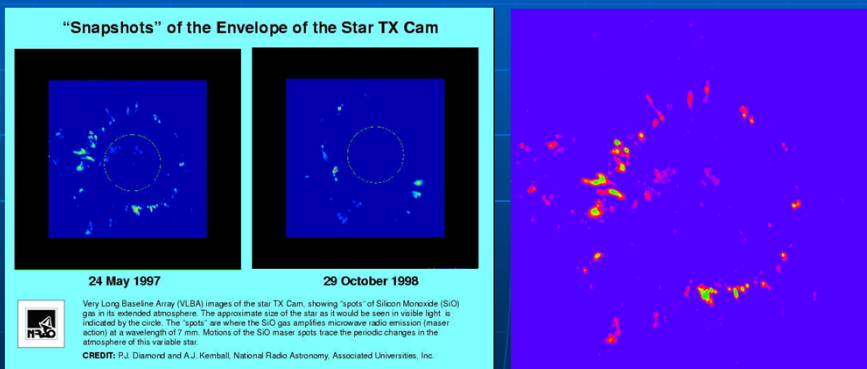
# 星は分解できる？

- $\alpha$  Ori: 光学観測で星が点でない数少ない例



# SiO Maser in TX Cam

- SiOメーザーは数AUスケールに分布
- VLBI観測によって分解可能



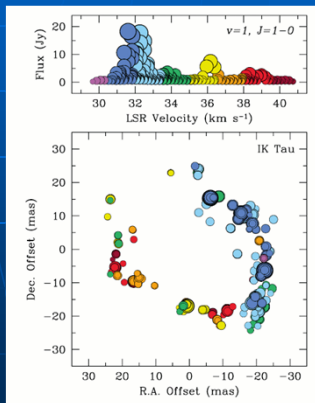
AGB星の星周領域の模式図

TX CamのSiOメーザー(VLBA)

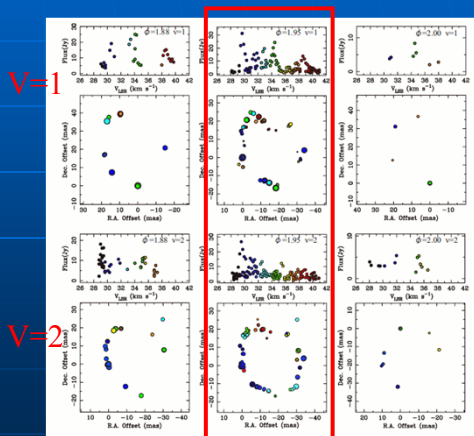


# SiO in IK Tau

Velocity structure varies with time (not a simple rotation, but more complex !)



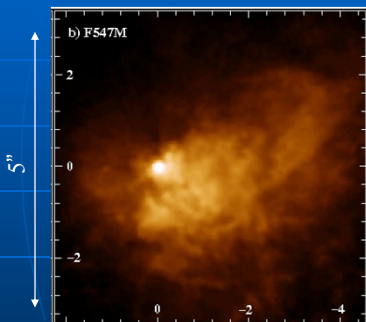
Boboltz et al. (2005)



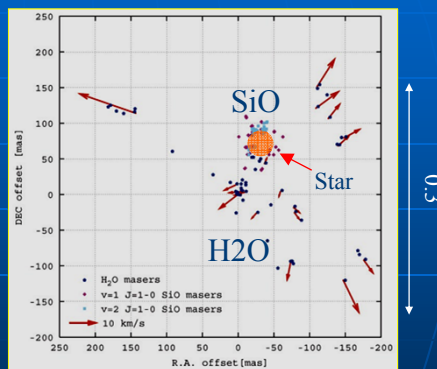
Matsumoto et al. (2008)

# VY CMaのメーザー

- VY CMa: 進化した大質量星(超新星爆発目前?)



HSTで見た質量放出  
(Smith et al. 2001)



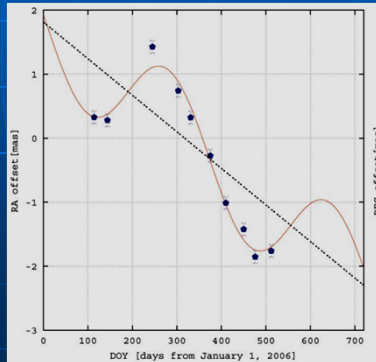
H2O と SiO メーザー  
(Choi et al., VERA)

SiO: ダスト生成層の内側(加速なし), H2O: 外側(加速あり)

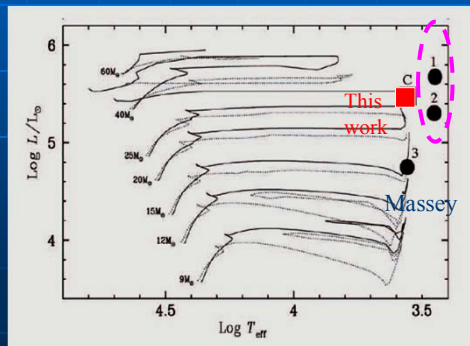
# VY CMa と HR 図

- 年周視差による距離:  $D = 1.1 \pm 0.1$  kpc, (VERA)
- VERAおよびMassey et al.(2006) の結果からHR図上での位置がほぼ確定。初期質量25太陽質量

in Hayashi's  
Forbidden area



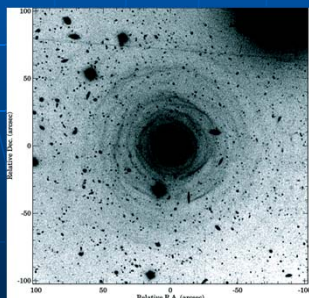
H2Oの位置変化(年周視差)



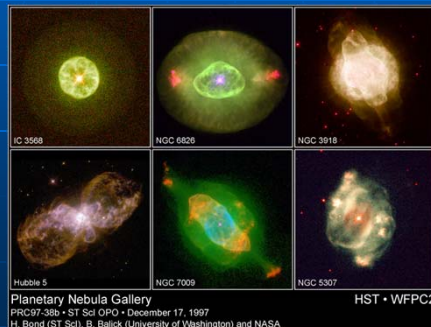
HR図上での位置

# 星の末期の対称性の破れ

- 太陽のような恒星: 基本的に級対称
- 星の最後(惑星状星雲, 超新星): 非対称  
AGB段階で非対称性が発現する?



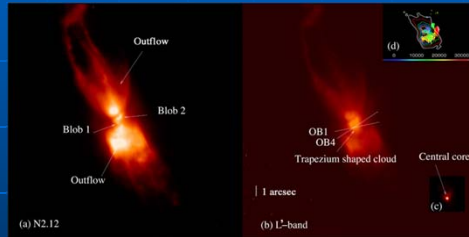
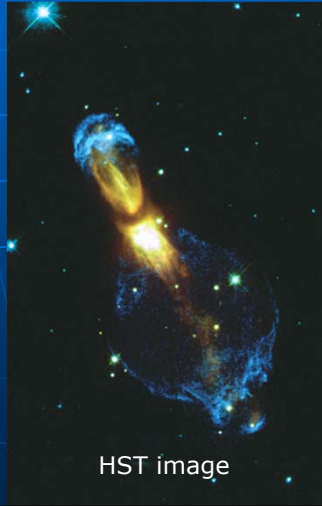
IRC+10216の対称なダストシェル



双極的な惑星状星雲

# Calabash Nebula OH231.8+4.2

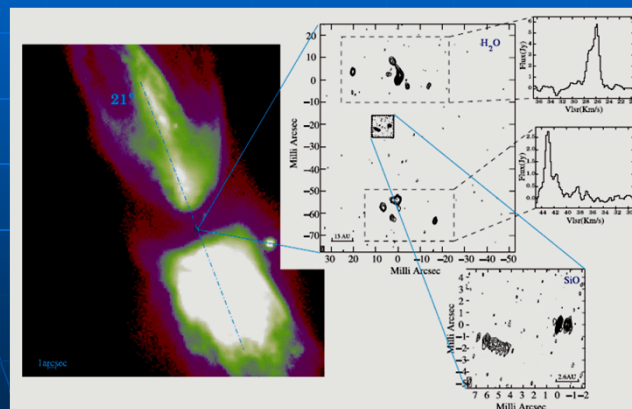
- Bipolar Nebular + AGB Star QX Pub



Matsuura et al.(2006)

# Masers in OH231.8

- H<sub>2</sub>O jet + SiO Disk ?

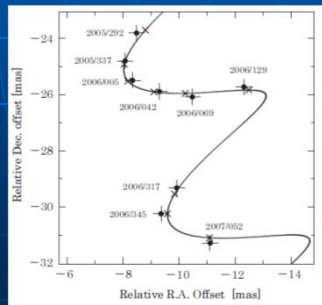


Desmurs et al.(2007)

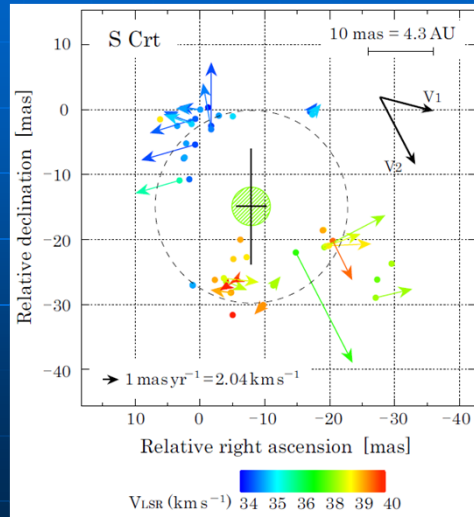
# H2O in S Crt

Nakagawa et al.(2008)

- Bipolar structure
- Maser distribution at radius of 5 – 10 AU
- Distance 430 +/- 25 pc
- photosphere  $260 \pm 20 R_{\text{sun}}$

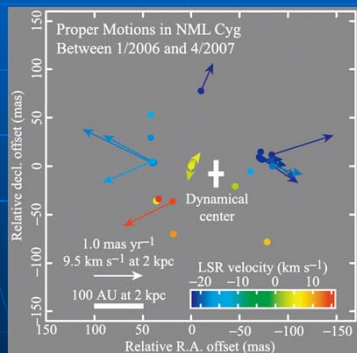


VERA  
 $\mu = 2.33 \text{ mas yr}^{-1}$  err 0.3

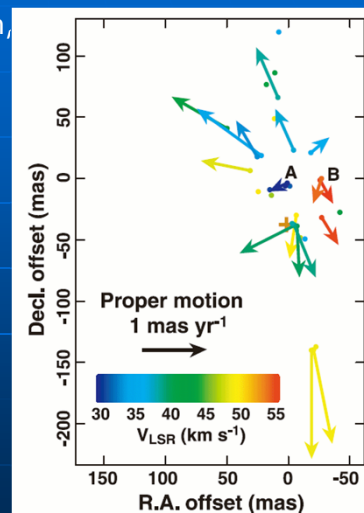


# H2O in NML Cyg / IRC-10414

- H2O maser shows bipolar distribution, and maser proper motion confirmed bipolar expansions of H2O masers



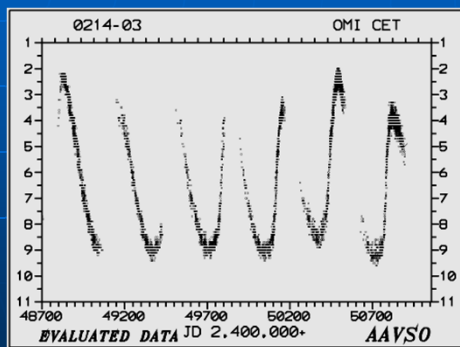
NML Cyg  
 Nagayama et al.(2008)



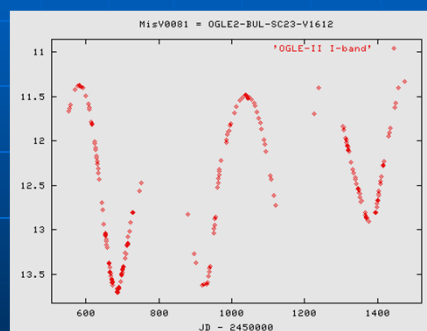
IRC-10414  
 Maeda et al.(2008)

# AGBの変光

- 脈動により変光する(ミラ型、半規則型 etc)
- ミラ  $\Delta m > 2.5 \text{ mag}$



ミラの光度曲線(AAVSO)

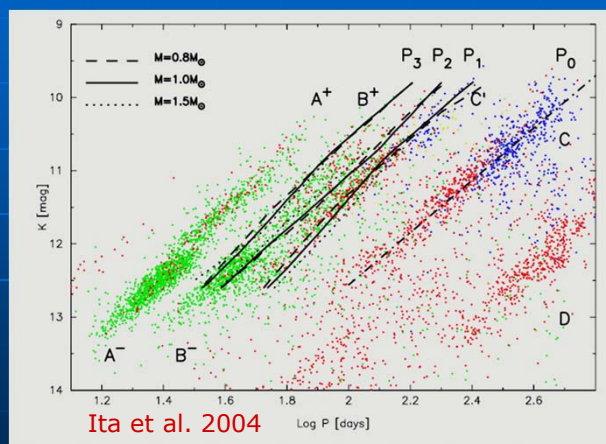


半規則型変光星の光度曲線(OGLE)

# ミラ型変光星の周期光度関係

- 周期と光度  
に良い相関

脈動モードによっ  
てミラやその他の  
ブランチがある

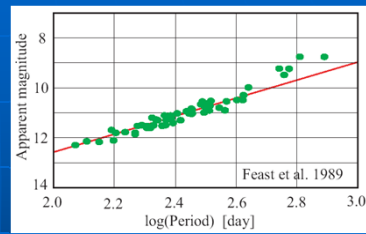


Ita et al. 2004

# Period Luminosity relation for Mira

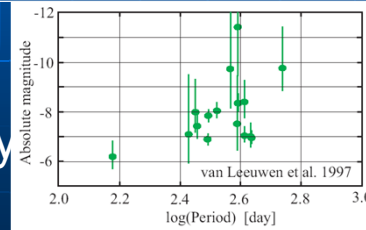
Large Magellanic Clouds  
(Feast et al. 1989)

LMC



Nearby Mira with HIPPARCOS  
(van Leeuwen et al. 1997)

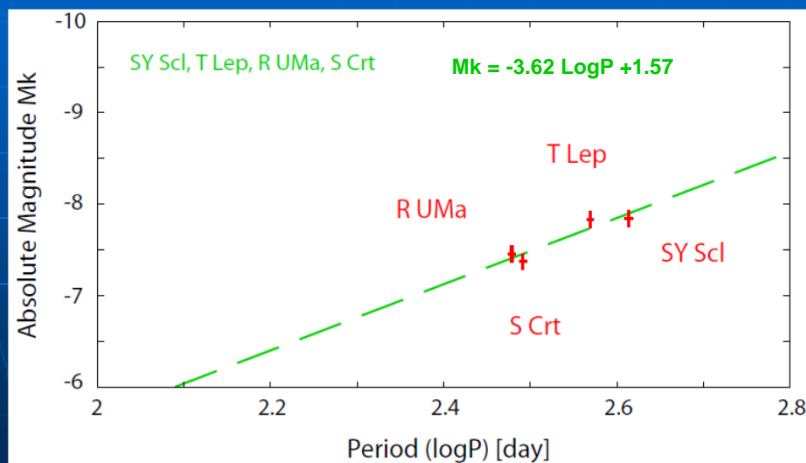
The Galaxy



Accurate Calibration is important

# Preliminary PL relation with VERA

- SY Scl, T Lep, R UMa, (S Crt, semiregular)

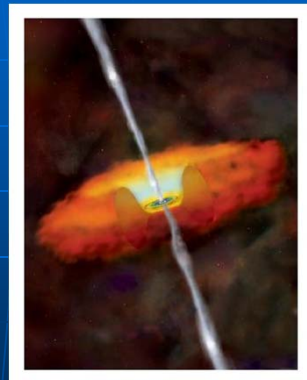


(Nakagawa et al in prep)

# AGN/ブラックホール

## AGNの描像

- 中心にブラックホールが存在
- BHに落ち込むガスが降着円盤を形成。ガスの重力エネルギーを解放して明るく輝く。
- 一部の物質はジェットとして出てゆく





## AGN zoo

AGNは特徴によりさまざまな名前と呼ばれる...

- QSO, Seyfert 1,2...: 光学での分類
- Radio-loud/quiet: 電波強度
- 電波銀河: 電波+光
- FRI, FRII: 電波ローブサイズ
- Blazar: "BL Lac"-like ... and more

どれもBH+降着円盤+ジェットの様で統一的に解釈される

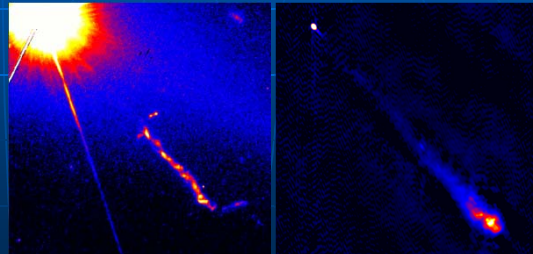
## AGNの発見

- 3C273  
ケンブリッジ大の3Cカタログで発見 (1959)  
月の掩蔽を用いて位置計測と光学同定が行われ、約13等級のクェーサー( $z=0.158$ )が発見された (1963)。

3C273 光学写真



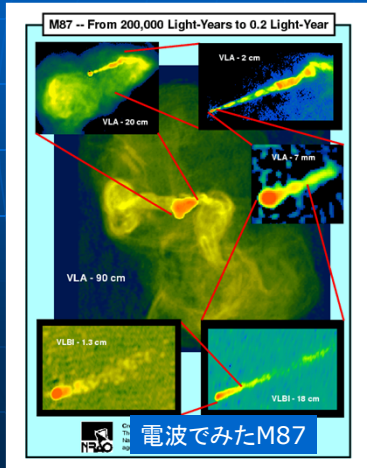
光および電波でみえるジェット



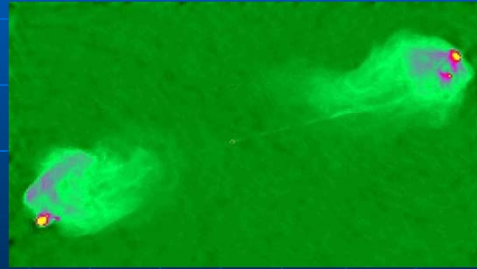
QSOの莫大なエネルギーを説明するためにBHエンジン説が有力に

## 電波銀河

- AGNから光速に近い速度でジェットが放出され、ジェットとローブを形成。ジェットはシンクロトロンで明るく、VLBI観測可能。



電波銀河 はくちょう座A (VLA)

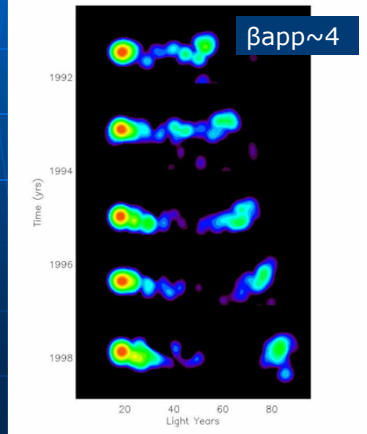


相対論的ジェット+電波ローブ

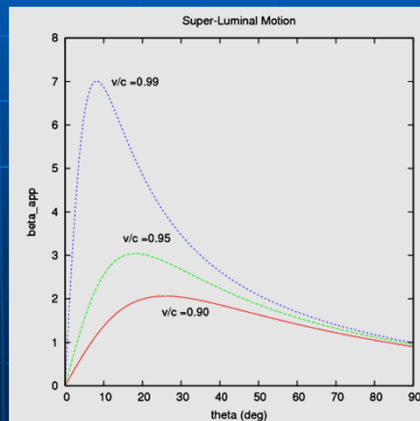
## ジェットの超光速運動

- 光速に近いジェットの天球面上での見かけの速度は光速度よりも大きく見えることがある（光速近くまで加速された証拠）

電波でみた3C279の超光速運動

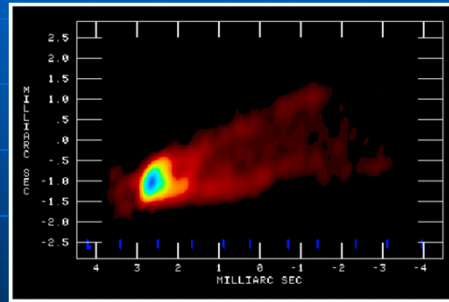
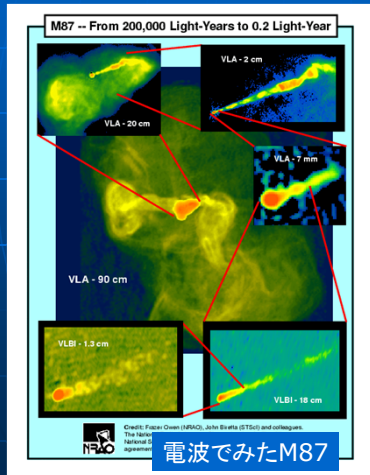


ジェットの見かけの運動速度と  
ジェットを見込む角の関係



## M87のジェット

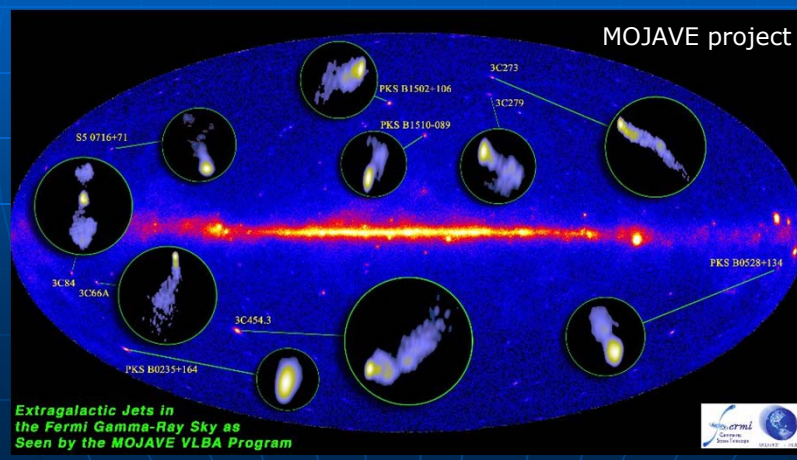
- VLBAで見た中心部のモニター観測からジェットの流  
れが見える



M87の電波コアとジェットのモニター  
(Walker+ with VLBA)

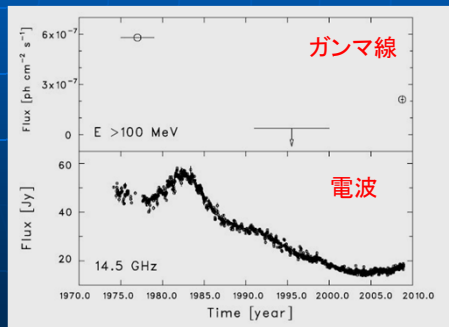
## Fermi vs VLBI

- 多くのFermi-ガンマ線源がジェット天体  
逆コンプトン効果によって光子がたたきあげられて  
いるためと考えられる。

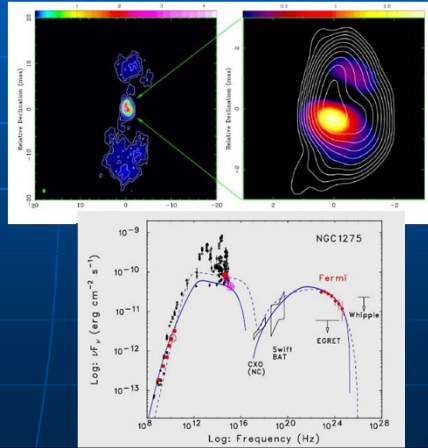


## 3C84のガンマ線フレア

- Fermiがガンマ線での増光を発見。
- その後、電波もフラックスが増大。相関がある



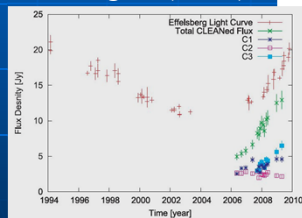
Abdo+(2009)



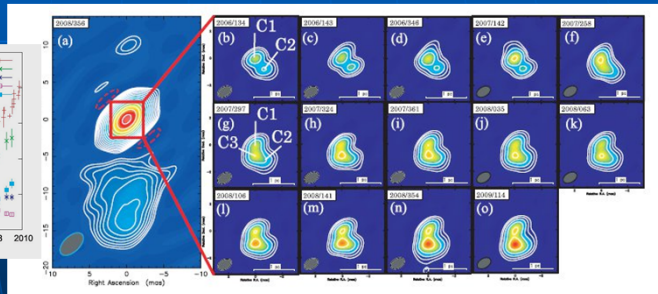
## 3C84 with VERA

- 3C84: radio jet detection (VERA) associated with  $\gamma$ -ray flare (Fermi)

Nagai+(2010)



Radio light curve

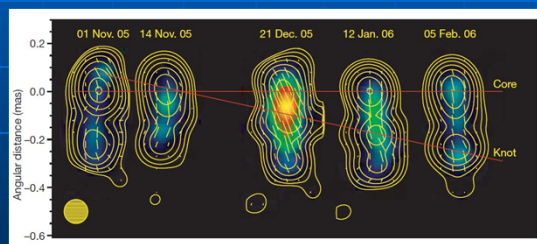


VLBI map (2 x 2 pc)

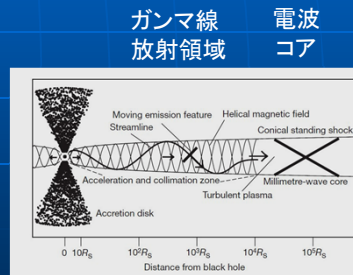
ガンマ線のフレアに遅れて新たなジェットコンポネントの出現を検出

## ガンマ線放射領域は？

- Marsher+(2008) :BL Lacの多波長モニター  
最初のガンマ線フレアに遅れて電波のフレアと  
超光速運動のノットを確認。



VLBI monitor image



Schematic view

Radio core is far away from BH itself (?)

## AGNの電波ジェットの特徴

- シンクロトン放射で明るく輝く
- 細く絞られている
- 超高速運動を示すものが存在  
(実運動速度が光速に近い)

どのように放出、加速し、どのよう絞るかは未知  
降着円盤に迫る解像度でジェットの根元を見る  
必要がある。

# 降着円盤とBH

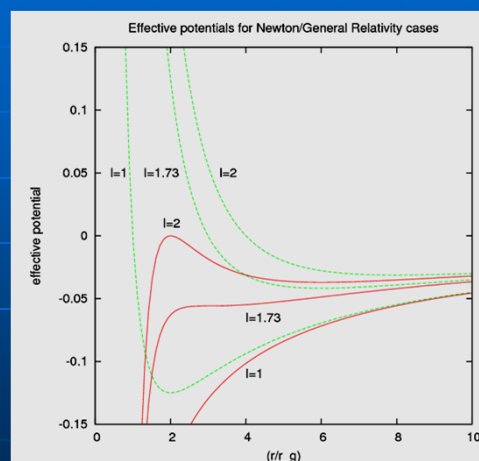
## BH近傍の粒子の運動

- BH近傍で安定な円軌道が存在しない
- シュバルツシルト場の場合

$$R = 3 R_g$$

が最内安定円軌道  
(Innermost Stable  
Circular Orbit)

降着円盤は真ん中に穴が  
あいたドーナツ状になる



ニュートンの／相対論的な場合の実効ポテンシャル

## 標準降着円盤

- ガスの降着によって解放するエネルギーを局所的な黒体輻射で放射する円盤

- 円盤の温度(オーダー評価)

AGNの明るさ  $L \sim GM \, dM/dt / 2r$

円盤の大きさをRとし、平均温度Tの黒体輻射とすると、

$$L \sim 2 \times \pi R^2 \times \sigma T^4$$

- これより、  $T \sim (GM \, dM/dt / 4\pi\sigma R^3)^{1/4}$

## 標準降着円盤 (2)

- 典型的なAGNのパラメーター

$$M \sim 3 \times 10^7 M_{\text{sun}}, \quad dM/dt \sim 1 M_{\text{sun}} / \text{yr}$$

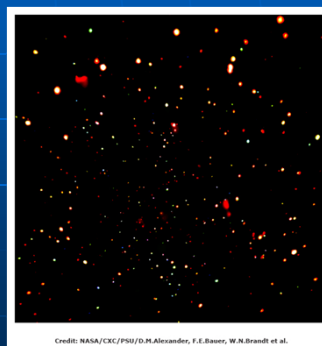
$$R \sim 3 R_g$$

を用いると、

$$T \sim 2 \times 10^5 \text{ K}$$

→ 紫外線~X線で輝く

(実際のAGNからの放射は熱放射だけでなく、非熱的な成分の寄与が大きい)



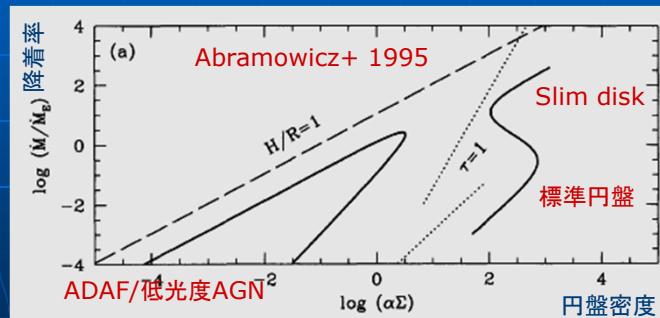
Credit: NASA/CXC/PSO/D.M.Alexander, F.E.Sauer, W.N.Brandt et al.

X線衛星Chandraで見た遠方銀河。  
明るいAGNが選択的に多数観測される。



## 降着円盤

- BH周囲の降着円盤には物理状態の異なるいくつかの状態がある。



VLBIで円盤を直接観測できる可能性があるのはADADF円盤  
(重力エネルギーを放射で解放しないため、きわめて高温になる)

## 低光度AGN

- 活動性が低い(暗い)AGNは、標準円盤では説明できない。
- もっとも顕著な例は、銀河系中心のBHであるSgr A\*

$$M \sim 3 \times 10^6 M_{\text{sun}}, L \sim 2.5 \times 10^3 L_{\text{sun}}$$

$$dM/dt \sim 2 \times 10^{-9} M_{\text{sun}} / \text{yr}, R \sim 3 R_g$$

を用いると、

$$T \sim 7000 \text{ K}$$

→ 可視光で明るい天体のはず(実際は見えない)

## 低光度AGNとBH

- Sgr A\*の場合、周囲のガスの質量から、最低でも  
 $dM/dt \sim 10^{-6} M_{\text{sun}}$   
 程度と期待される。この場合、  
 $L \sim 10^6 L_{\text{sun}}$   
 となり、観測値を大きく上回る。このような放射が外部に出ないためには、降着円盤のガスの放射効率が悪く、重力エネルギーの解放によって得られたエネルギーを熱として蓄えたまま、ブラックホールに落ちていく必要がある

→ Sgr A\*には通常天体のような表面はなく、ブラックホールであることを示唆する

このタイプのAGNは、光度が低く温度が極めて高い ( $T \sim 10^9 - 10^{10}$  K) 円盤を持つ > VLBIの観測対象

## Apparently-large BHs

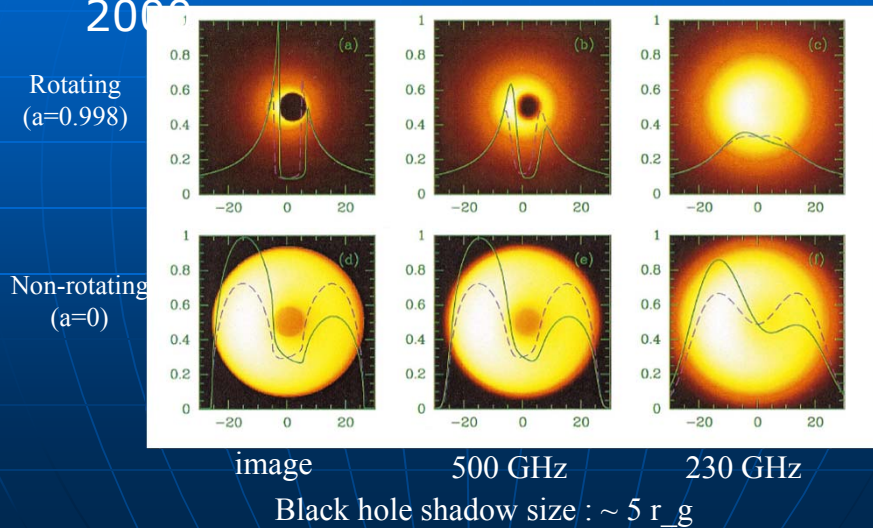
source	$M_{\text{BH}}/M_{\text{sun}}$	Distance	Angular radius
Sgr A*	$4 \times 10^6$	8 kpc	$10 \mu\text{as}$
M87	$3 \sim 6 \times 10^9$	15 Mpc	$4 \sim 7 \mu\text{as}$
M104	$1 \times 10^9$	10 Mpc	$2 \mu\text{as}$
Cen A	$5 \times 10^7$	4 Mpc	$0.25 \mu\text{as}$



Shadow diameter : 1~5 times Schwarzschild radius  
 For imaging shadow,  $\sim 10 \mu\text{as}$  resolution is required

## Sgr A\* ブラックホールはサブミリ波で見える？

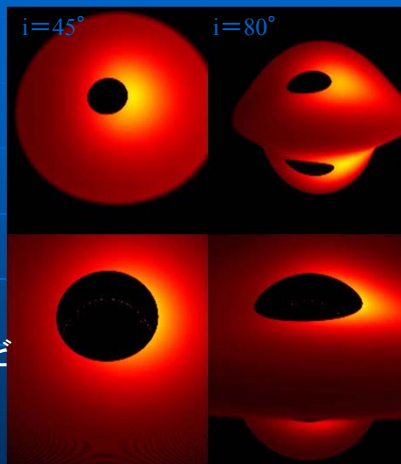
- Simulated image by Falcke et al. 2000



## Sgr A\*ブラックホールのシュミレーション

Takahashi et al.(2004)

- ブラックホールのパラメーターによってさまざまなイメージが期待される
- ブラックホール質量、スピン、降着円盤の傾きなど



ブラックホールシャドウ >

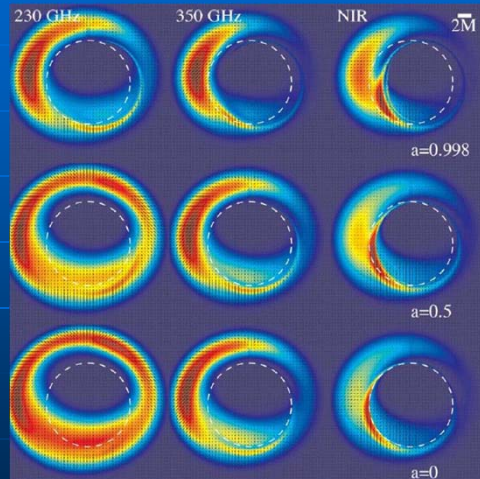
ブラックホール存在の証拠であり、また  
ブラックホールのパラメーターを決める重要情報

## Sgr A\*ブラックホールのシュミレーション

Broderick (2006)

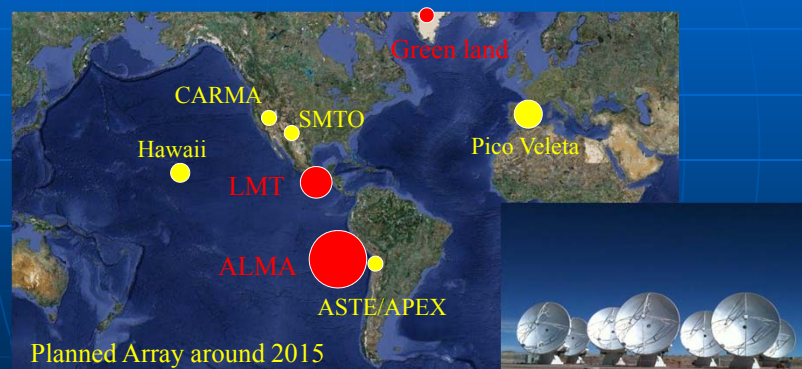
パラメーターによる  
違いや周波数による  
違いも

実際の観測ではどう  
なっている？  
(今後の課題)



## Sub-mm VLBI around 2015

- 9000km基線、波長1mmで分解能 $\sim 20\mu\text{s}$   
Sgr A\*の $R_g$ の2倍、M87の3倍



最短で2015年頃にはBHシャドウが見える!?